

УДК 622.24

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ БУРІННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОМИСЛОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

А.І.Волобуєв, М.М.Слепко

ІФНТУНГ, 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42153,  
e-mail: [drill@nung.edu.ua](mailto:drill@nung.edu.ua)

*Рассматривается возможность использования накопленных данных об отработке долот в ранее пробуренных скважинах для оптимизации режимных параметров при роторном бурении на стадии проектирования. Особое внимание уделяется оптимизационным расчетам для абразивных пород, поскольку по имеющейся информации непосредственно воссоздать характер изменения механической скорости во времени невозможно. Даются математические модели для малоабразивных и абразивных пород.*

*The paper deals with the possibility of using data for drilling bit wear in the previously drilled wells for optimization of the operating conditions when using rotary drilling at the design stage. Special attention is paid to the optimization calculations for abrasive rocks as the available information doesn't make it possible to re-create the character of the mechanic speed in time as such. Presented are mathematical model for semi abrasive and abrasive rocks.*

Загальновідомо, що показники буріння (особливо механічна швидкість) залежать від дуже багатьох факторів, що робить практично неможливим їх прогнозування аналітичними методами. Саме цим пояснюється той факт, що оптимізація режиму буріння знаходиться на початковому рівні. Оскільки детальна формалізація процесу буріння є нереальною, вихід слід шукати у використанні промислової інформації, опираючись на показники, які було отримано в раніше пробурених свердловинах. При цьому слід розраховувати на реально існуючу інформацію, що міститься в картках відробки доліт або в базах даних.

Для реалізації даної концепції треба задати базовими залежностями –  $T(P, n)$ ,  $V_m(P, n)$ , а для абразивних порід – ще і  $V_m(T_\theta)$ . Визначення очікуваних показників базується на так званому методі перерахунку. Цей метод зручно застосовувати, коли відомо значення шуканого показника при якихось вхідних даних, а нам треба знайти його значення при інших вхідних даних. Зрозуміло, якщо нам відома залежність шуканого показника від цих даних. Наприклад, якщо відомо, що при навантаженні  $P_0$  механічна швидкість дорівнює  $V_0$ , а залежність  $V_0(P_0)$  описується формулою  $V=aP^X$ , то очікувану механічну швидкість  $V$  можна визначити із співвідношення

$$\frac{V}{V_0} = \frac{aP^X}{aP_0^X}; \quad V = V_0 \cdot \left( \frac{P}{P_0} \right)^X. \quad (1)$$

Позитивним є те, що при такому підході відпадає необхідність знати коефіцієнт “а”, який залежить від багатьох факторів, кожен з яких якимось чином впливає на механічну швидкість буріння. Замість цього для розрахунків беремо реальну механічну швидкість, незважаючи на те, які чинники зумовили її величину.

Математична модель залежить від того, в яких породах – абразивних чи малоабразивних – передбачається буріння. За основний критерій в обох варіантах приймається вартість 1 м проходки, додатково визначається рейсова швидкість.

Метою розрахунків є визначення вказаних показників при різних комбінаціях режимних параметрів. Для цього задаються діапазони зміни навантаження на долото ( $P_{min} - P_{max}$ ) і швидкості обертання ( $n_{min} - n_{max}$ ) і відповідні кроки, і для всіх комбінацій  $P_i$  та  $n_i$  визначаються очікувані показники рейсу, з яких вибираються режими, прийнятні для реалізації.

Для малоабразивних порід застосовуються такі залежності:

$$V_i = V_0 * \left( \frac{P_i}{P_0} \right)^X * \left( \frac{n_i}{n_0} \right)^Y, \quad (2)$$

$$T_i = T_0 * \left( \frac{P_0}{P_i} \right)^\alpha * \left( \frac{n_0}{n_i} \right)^\beta, \quad (3)$$

$$H_i = V_i * T_i, \quad (4)$$

$$V_{Pi} = \frac{H_i}{T_i + T_{don}}, \quad (5)$$

$$C_i = \frac{C_e}{V_{Pi}} + \frac{C_d}{H_i}, \quad (6)$$

де:  $P_0$  і  $n_0$  – базові режимні параметри (відповідно навантаження на долото і швидкість обертання), на яких відпрацьовувались долота даного типорозміру;

$V_0$  – базова середня за рейс механічна швидкість буріння, отримана при базових режимних параметрах;

$T_0$  – базовий ресурс опор при базових режимних параметрах;

$P_i$  і  $n_i$  – альтернативні режимні параметри в заданих діапазонах;

$V_i$  – очікувана механічна швидкість при відповідній комбінації  $P_i$  і  $n_i$ ;

$T_i$  – очікуваний ресурс опор;

$H_i$  – очікувана проходка за рейс;

$V_{pi}$  – очікувана рейсова швидкість буріння;

$T_{don}$  – час на усі допоміжні операції (включаючи СПО);

$C_i$  – очікувана вартість 1 м проходки;

$C_e$  – вартість 1 год. експлуатації бурової установки;

$C_0$  – вартість долота.

Для абразивних порід, оскільки механічна швидкість з часом зменшується, має бути враховано, окрім зазначених двох аргументів (навантаження і швидкості обертання) ще і третій – час буріння. Для цього треба знати темп падіння механічної швидкості в часі. Але такої інформації в промислових даних немає. Є лише час буріння  $t_0$ , проходка за цей час  $h$  і середня за рейс механічна швидкість буріння  $V_{cp}$ , звідки можна записати

$$h = V_{cp} \cdot T_0. \quad (7)$$

На думку багатьох авторів, зміна механічної швидкості в однорідних абразивних породах відбувається за експоненціальним законом:

$$V_t = V_n * e^{-Z * t_0}, \quad (8)$$

а проходка за час  $t_0$  дорівнює

$$h = \frac{V_n - V_t}{Z}, \quad (9)$$

де:  $V_n$  – початкова механічна швидкість;

$V_t$  – механічна швидкість після часу буріння  $t_0$ ;

$V_k$  – кінцева швидкість буріння;

$Z$  – показник експоненти, що характеризує темп падіння механічної швидкості буріння.

Поєднавши промислову інформацію із зазначеними залежностями, отримаємо рівняння

$$\frac{V_n - V_k}{Z} = V_{cp} \cdot t_0, \quad (10)$$

з якого можна визначити показник експоненти  $Z$ .

Але в цьому рівнянні ліва частина складається з трьох невідомих: початкової швидкості  $V_n$ , кінцевої швидкості  $V_k$  і показника експоненти  $Z$ .

Щодо кінцевої механічної швидкості, нею можна задатися. І в цьому закладена певна невизначеність, оскільки такої інформації в базах даних немає. Але, якщо відомо, що на даній площі раціональна відробка доліт за критеріями  $C_{min}$  або  $V_{p \max}$  не здійснювалася, тоді можна припустити, що буріння тривало до повного зносу озброєння і кінцева швидкість була близько нуля. Слід зазначити, що введення нуля може призвести до некоректних математичних операцій (наприклад, ділення на нуль). Окрім того, не варто кінцевій швидкості надавати за-

надто малого значення (наприклад,  $1E-06$ ), оскільки це, певним чином, впливає на результати обчислень. Тому можна прийняти  $V_k = 0,1$  м/год, що практично є нулем.

Для однозначного визначення невідомих  $V_n$  і  $Z$  теж немає промислової інформації. Тому треба задатися ще однією з двох величин.

Порівняльний аналіз свідчить на користь початкової швидкості  $V_n$ , оскільки визначення показника експоненти  $Z$  без хронометричних спостережень неможливо. Крім того, слід врахувати, що  $Z$  є показником степені і його вплив на результати обчислень значно більший, ніж множника  $V_0$ .

Наближене значення початкової швидкості можна з'ясувати шляхом експертного опитування практиків, але при цьому слід мати на увазі, що у виробничників початкова швидкість асоціюється з реальною швидкістю на початку рейсу, тоді як у формулу входить уявна швидкість, якої в дійсності немає. Відомо, що експлуатація долота починається з його "обкатки" на послабленому режимі з поступовим виведенням на робочий режим. Тому експертна оцінка початкової швидкості буде, як правило, нижчою, ніж та, що входить у формулу.

Експертна оцінка на етапі проектування може бути досить проблематичною, тому привабливим є шлях, при якому початкова швидкість виражалася б через якийсь показник, існуючий в базі даних. Таким показником може бути середня за рейс механічна швидкість буріння.

Для пошуку співвідношення між початковою і середньою швидкостями було проаналізовано реальні хронометражні графіки зміни механічної швидкості в часі. Встановлено, що відношення  $V_n/V_{cp}$  (далі –  $K$ ) коливається в межах  $2,5 \div 5$ .

Перевірка на конкретних рейсах показала, що розрахунки із вказаними співвідношеннями дають дещо занижені результати по проходці за рейс. Можна припустити, що це є результатом накладання періоду "обкатки" долота, де зміна швидкості в часі не відповідає експоненціальній залежності. Але ця неадекватність може бути суттєво скомпенсована введенням поправочного коефіцієнта  $\gamma$ , більшого за одиницю.

Таким чином, якщо немає інших даних, можна прийняти, що  $V_n = 3V_{cp}$ ;  $V_k = 0,1$  м/год;  $\gamma = 1,05$ .

Тоді математична модель виглядатиме так:

$$Z_0 = \frac{V_n - V_k}{V_{cp} * T_0} \quad \text{або} \quad Z_0 = \frac{3V_{cp} - V_k}{V_{cp} * T_0}, \quad (11)$$

$$V_{nX} = V_n * \left( \frac{P_i}{P_0} \right)^X * \left( \frac{n_i}{n_0} \right)^Y, \quad (12)$$

$$R_X = T_0 * \left( \frac{P_0}{P_i} \right)^\alpha * \left( \frac{n_0}{n_i} \right)^\beta, \quad (13)$$

$$\varepsilon = 0.3 + 17 * \left( \frac{P_i}{D_0} \right), \quad (14)$$

$$Z_X = Z_0 * \left( \frac{n_i}{n_0} \right) * \left( \frac{P_i}{P_0} \right)^\varepsilon, \quad (15)$$

$$V_i = V_{nX} * e^{-Z_X * T}, \quad (16)$$

$$H_i = \frac{V_{nX} - V_i}{Z_X} * 1.05, \quad (17)$$

$$V_{Pi} = \frac{H_i}{T_i + T_{дон}}, \quad (18)$$

$$C_i = \frac{C_e}{V_p} + \frac{C_d}{H_i}. \quad (19)$$

В наведених формулах величини з індексом “0” є базовими, тобто тими, що містяться в промисловій інформації. А величини з індексом “i” – очікуваними при тих чи інших режимних параметрах, відмінних від базових.

Символи в формулах означають:

$Z_0$  – показник експоненти при базовому режимі;

$Z_X$  – очікуваний показник експоненти при режимі, відмінному від базового;

$R_X$  – очікуваний ресурс опор долота при режимі, відмінному від базового;

$V_{nX}$  – очікувана початкова швидкість буріння при режимі, відмінному від базового;

$\varepsilon$  – емпіричний коефіцієнт, що характеризує вплив навантаження на темп падіння механічної швидкості буріння;

$D_0$  – діаметр долота в мм.

Емпіричні коефіцієнти на початковому етапі можна взяти такими:  $\alpha \approx 0,6$ ;  $\beta \approx 1$ ;  $x \approx 1$ ;  $y \approx 0,6$ . Але потім їх варто уточнити наступними спостереженнями.

На заключення слід наголосити, що якість оптимізації режимних параметрів залежить від правильності вибору варіанту розрахунку відповідно до властивостей порід (абразивні чи малоабразивні). Для цього в розрізі треба попередньо виділити інтервали за цією ознакою. Найпростіше це можна зробити шляхом експертного опитування виробничників стосовно характеру випереджаючого зносу доліт: по опорах чи озброєнню, або по кодованому опису зносу доліт, якщо в базах даних є така інформація.

Для реалізації описаних математичних моделей на кафедрі буріння ІФНТУНГ створено відповідні комп'ютерні програми.

УДК 539.3: 622.24

## ТЕОРЕТИЧНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ КРИТИЧНИХ СТАНІВ ВЕРТИКАЛЬНИХ КОЛОН НАДГЛИБИННОГО БУРІННЯ

В.І.Гуляєв, В.В.Гайдайчук, І.Л.Соловійов, І.В.Горбунович

Національний транспортний університет, 01010, м. Київ, вул. Суворова, 1,

e-mail: valery@gulyayev.com.ua

*Поставлена задача об устойчивости и свободных колебаниях глубоких вращающихся буровых колонн, которые преднапряжены продольной силой и крутящим моментом. С учетом статических и динамических эффектов силового взаимодействия указанных механических факторов построены разрешающие уравнения. Предложена методика их решения, основанная на применении метода продолжения по параметру и метода ортогонализации. Выполнены исследования устойчивости и колебаний буровых колонн длиной до 10000 м*

*The problem about free vibrations of rotating drill columns prestressed by torque and longitudinal force is stated. The constitutive equations are formulated with allowance made for static and dynamic effects of force interaction between the mentioned factors. The techniques of the equation integration are proposed, which are based on application of the transfer matrix method and the orthogonalization method. The investigations of stability and vibrations of the 10 km length drill strings are performed.*

**Вступ.** При видобутку палив з великих глибин підвищення ефективності буріння вертикальних свердловин роторним способом тісно пов'язано з проблемами виявлення критичних режимів функціонування бурових колон і з розробкою заходів для зниження їх негативного впливу на технологічний процес. До таких явищ відносяться втрата стійкості прямолинійної форми БК у нижній її частині по типу стисло-вигнутого закрученого стержня; збурення поздовжніх коливань БК під дією різних збурень технологічного характеру; збурення резонансних згинних коливань БК, які зумовлені

геометричними недосконаlostями і дисбалансом усієї системи та окремих її частин; параметричне самозбурення крутих коливань БК, що викликані нелінійними силами тертя зривної взаємодії між різальним інструментом і оброблюваною породою. Зазначені явища можуть призводити до аварійних ситуацій, що супроводжується обривом труби БК, прихваткою інструмента, що різє, у зоні різання породи і загибання ділянок БК у породу, розгвинчуванням труб БК, відхиленням осі свердловини від вертикалі та її незапланованим викривленням, а також втратою стійкості стінок свердловини і